

MONITORAMENTO TEMPORAL DE VARIÁVEIS ESPECTRAIS EM ÁREAS DO PANTANAL UTILIZANDO DADOS AVHRR/NOAA-17

Multi-temporal Monitoring of Spectral Variables in Pantanal Areas using AVHRR/NOAA-17 Data

Júlio César Dalla Mora Esquerdo
João Francisco Gonçalves Antunes

Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária – EMBRAPA

Embrapa Informática Agropecuária

Caixa Postal 6041 – 13083-886 – Campinas-SP, Brasil

julio@cnptia.embrapa.br

joaof@cnptia.embrapa.br

RESUMO

Embora seja um dos ecossistemas mais conservados do Brasil, o Pantanal está sujeito a problemas como o fogo, desmatamentos e alterações dos ciclos de cheia e seca. O monitoramento de toda a extensão do Pantanal é fundamental para a detecção de problemas relacionados a alterações do uso e da cobertura do solo, assim como inferir sobre o nível das cheias que ocorrem na planície. O objetivo deste estudo foi utilizar dados AVHRR/NOAA-17 no monitoramento temporal dos índices espectrais NDVI e NDMI e da faixa espectral do infravermelho médio (IVM) de quatro grandes áreas do Pantanal, com distintas coberturas vegetais, ao longo de cinco anos e verificar suas relações. Sistemas automáticos de processamento de imagens e de extração dos dados espectrais foram utilizados para automação das análises. Os resultados mostraram o potencial do monitoramento temporal na determinação dos padrões espectrais dessas áreas. A análise do IVM de uma área propensa à inundação permitiu detectar o padrão das cheias do Pantanal e diferenciar os anos com maiores volumes de água. A análise do NDVI permitiu a caracterização do padrão temporal dos tipos de vegetação estudados. Já o NDMI mostrou comportamento distinto ao NDVI somente com a exposição da água durante as cheias, sendo uma informação redundante na maioria dos casos.

Palavras chaves: Sensoriamento Remoto, Processamento de Imagens, Áreas Úmidas, NDVI, NDMI, Infravermelho Médio.

ABSTRACT

Although one of the most preserved ecosystems in Brazil, the Pantanal is liable to problems such as fire, deforestation and changes in the flood and drought cycles. Monitoring the Pantanal is essential to detect problems related to land use changes and to infer on the level of floods in the wetlands. This study aimed to use AVHRR/NOAA-17 data in the temporal monitoring of the NDVI and NDMI spectral indices and the mid-infrared spectral band (IVM) in four areas of the Pantanal, with different vegetation covers over five years and to verify their relations. Automated systems of image processing and spectral data extraction were used in order to speed up the analysis. The results showed the potential of the temporal monitoring to establish the spectral patterns of these areas. The IVM analysis in an area prone to flooding allowed identification of flooding pattern and differentiate the wettest years. The NDVI analysis enabled to characterize the temporal pattern of vegetation types studied. The NDMI showed a distinct pattern of NDVI only with exposure to water during the floods, and a redundant information in most cases

Keywords: Remote Sensing, Image Processing, Wetlands, NDVI, NDMI, Mid-infrared.

1. INTRODUÇÃO

O Pantanal é a uma das maiores planícies inundáveis do mundo e abriga uma grande concentração de vida silvestre. Embora seja um dos ecossistemas mais conservados do Brasil, com 85% do

habitat original, o Pantanal é afetado por problemas como o fogo e desmatamentos. Além disso, alterações antrópicas na vegetação da parte alta da Bacia do Alto Paraguai refletem nos ciclos de cheia e seca da planície pantaneira. Dessa forma, é essencial que a bacia seja constantemente monitorada para a detecção de

problemas relacionados a alterações do uso e da cobertura do solo, assim como inferir sobre o nível das cheias que ocorrem na planície. Pela grande extensão do Pantanal, as imagens de satélite tornam-se instrumentos importantes para essa finalidade, por proverem uma visão sinóptica de todo o bioma.

Atualmente existe uma série de sensores disponíveis aos usuários, gerando dados da superfície terrestre com diferentes detalhamentos e periodicidades. Um sensor importante é o *Advanced Very High Resolution Radiometer*, a bordo dos satélites da NOAA (*National Oceanic and Atmospheric Administration*), que gera imagens com resolução espacial de 1,1km (no nadir) numa resolução temporal de 12 horas. Desenvolvido para fins meteorológicos, o sensor AVHRR apresenta canais espectrais nas faixas do visível e infravermelhos próximo e médio e, por essa razão, suas imagens são também empregadas para observação da superfície terrestre.

Embora existam sensores de melhor qualidade espacial e espectral com curto tempo de revisita, os dados AVHRR/NOAA continuam tendo grande potencial de aplicação em estudos envolvendo a análise de ecossistemas, principalmente pela disponibilidade de longas séries temporais armazenadas em acervos históricos espalhados pelo mundo. No entanto, não existem disponíveis aos usuários sistemas de distribuição de dados pré-processados e prontos para uso, o que torna difícil a condução de estudos envolvendo séries temporais de imagens. Nesse sentido, métodos automáticos e precisos de processamento de imagens devem ser empregados no tratamento de grandes volumes de imagens brutas.

Das imagens NOAA é possível a extração de produtos espectrais da superfície terrestre, como o conhecido Índice de Vegetação da Diferença Normalizada – NDVI (*Normalized Difference Vegetation Index*), o Índice de Umidade da Diferença Normalizada – NDMI (*Normalized Difference Moisture Index*), o albedo de superfície, a temperatura de superfície, entre outros. O NDVI, inicialmente proposto por Rouse *et al.* (1973), apresenta correlação com biomassa e por essa razão é utilizado no monitoramento da vegetação (TUCKER, 1979). Já o NDMI usa a informação extraída da faixa do infravermelho médio (IVM) e pode indicar variações de umidade na superfície (JIN e SADER, 2005).

O uso de informações da faixa do IVM se mostrou eficiente em estudos de áreas com forte influência hídrica, conforme relataram Antunes e Esquerdo (2007), que apontaram o potencial do IVM no monitoramento de áreas inundáveis do Pantanal. Isso se deve ao fato da forte influência da água na absorção da energia eletromagnética nessa faixa do espectro.

1.1 Objetivo

O objetivo deste estudo foi utilizar imagens AVHRR/NOAA-17 no monitoramento temporal das variáveis espectrais NDVI, NDMI e IVM de quatro

grandes áreas do Pantanal, com distintas coberturas vegetais, ao longo de cinco anos e verificar as relações entre elas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área do estudo

O estudo foi realizado em quatro áreas localizadas na planície do Pantanal, inserida na Bacia do Alto Paraguai, como mostra a Figura 1. Na época das chuvas, os rios da planície têm sua vazão aumentada, resultando nas inundações por conta da baixa declividade do relevo.

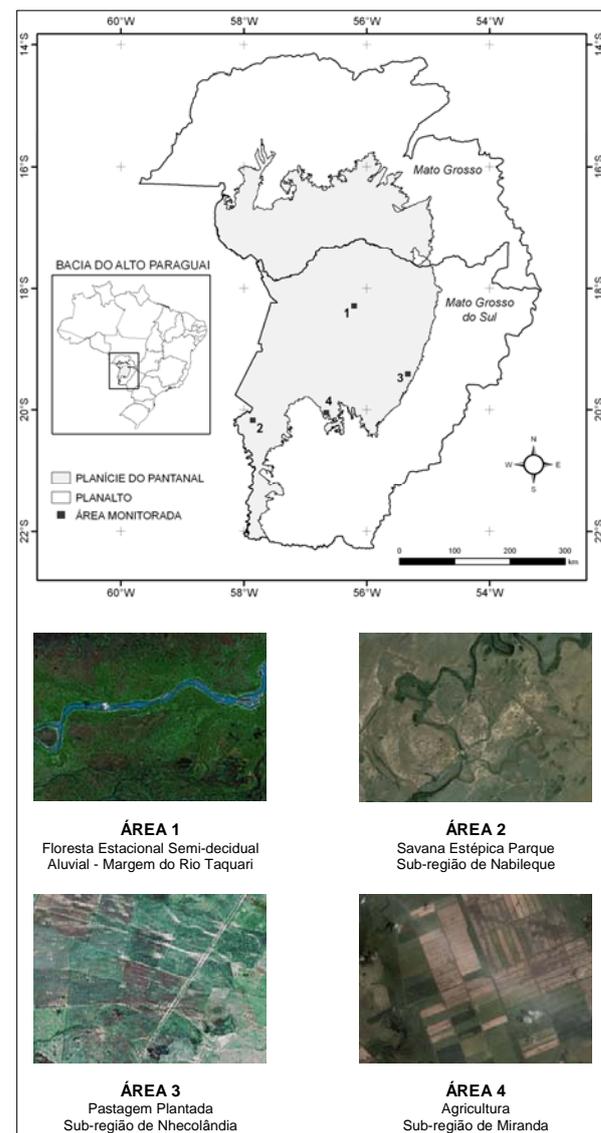


Fig. 1 – Bacia do Alto Paraguai e as quatro áreas monitoradas no Pantanal.

Foram escolhidas áreas com diferentes coberturas vegetais, sob diferentes influências da ação das cheias e, portanto, com comportamentos espectrais-temporais distintos. As regiões monitoradas incluíram coberturas vegetais de floresta semi-decidual, savana estépica, pastagem plantada e agricultura.

2.2 Dados espectrais

As imagens AVHRR/NOAA foram obtidas do acervo do Centro de Pesquisas Meteorológicas e Climáticas Aplicadas à Agricultura (CEPAGRI/UNICAMP), em seu estado bruto. Foram adquiridas ao todo 2.887 imagens das passagens diurnas do satélite NOAA-17 (13h30 GMT), entre janeiro de 2004 e dezembro de 2008.

As características espectrais da versão 3 do sensor AVHRR são mostradas na Tabela 1, onde se observa que o canal 3 pode captar a energia refletida (3A) ou emitida (3B) pela superfície terrestre. Essa característica confere ao sensor a possibilidade de captar a energia refletida pela superfície na faixa do IVM nas passagens diurnas e a energia emitida na faixa do infravermelho termal nas passagens noturnas. Entretanto, esse comportamento dual está em funcionamento apenas na plataforma NOAA-17, sendo que nas demais o canal 3B está permanentemente acionado.

TABELA 1 – CARACTERÍSTICAS ESPECTRAIS DO SENSOR AVHRR/3.

Banda	Faixa Espectral (µm)	Região do Espectro
1	0,58 a 0,68	Visível (vermelho) – VER
2	0,725 a 1,0	Infravermelho próximo – IVP
3A	1,58 a 1,64	Infravermelho médio – IVM
3B	3,55 a 3,93	Infravermelho termal
4	10,3 a 11,3	Infravermelho termal
5	11,5 a 12,5	Infravermelho termal

Fonte: Adaptado de Goodrum *et al.* (2004).

Para o processamento das imagens foi utilizado o sistema automático NAVPRO, proposto por Esquerdo *et al.* (2006), que inclui módulos de conversão de formatos, calibração radiométrica, georreferenciamento e geração de produtos. A principal característica deste sistema é seu método de georreferenciamento preciso e automático, baseado nos algoritmos da navegação indireta (ROSBOROUGH *et al.*, 1994) e da coleta automática de pontos de controle por meio da técnica da Máxima Correlação Cruzada (EMERY *et al.*, 2003). O sistema gera imagens processadas, com erros de posicionamento não superiores a um pixel (1,1km), sem qualquer intervenção humana.

De cada imagem diária foram gerados produtos dos índices NDVI e NDMI, além da banda IVM. As fórmulas para cálculo dos dois índices são mostradas pelas Equações (1) e (2).

$$NDVI = IVP - VER / IVP + VER \quad (1)$$

$$NDMI = IVP - IVM / IVP + IVM \quad (2)$$

Em todos os produtos diários foi aplicado o mascaramento de nuvens, de acordo com os critérios

adotados por Esquerdo *et al.* (2006), que consideram a refletância da Banda 1 e as temperaturas de brilho das Bandas 4 e 5. A partir das imagens diárias de NDVI e NDMI, foram geradas composições quinzenais de máximo valor, de modo a minimizar o efeito das nuvens não mascaradas e reduzir a influência atmosférica (HOLBEN, 1986). No caso da banda 3A (IVM), optou-se pela geração de composições de mínimo valor, uma vez que o objetivo da utilização dessa faixa espectral foi o de identificar a influência da água na superfície. A água é um forte absorvedor da radiação em quase todas as faixas do espectro eletromagnético. Assim, as composições de mínimo valor possibilitam a identificação de grandes corpos d'água, que apresentam refletância muito baixa.

2.3 Extração dos dados e filtragem dos perfis temporais

A extração dos valores espectrais foi feita de forma automática a partir de uma rotina desenvolvida em linguagem IDL (*Interactive Data Language*), para posterior geração dos perfis temporais em planilha eletrônica. Em cada uma das quatro áreas analisadas foram coletados valores médios presentes numa janela de 2 x 2 pixels, resultando numa área amostral de aproximadamente 4km² para cada região.

Apesar da adoção de técnicas para minimizar inconsistências dos dados, os valores extraídos das imagens apresentaram variações causadas por ruídos, ausência de dados e efeitos atmosféricos. Um algoritmo baseado em análise harmônica (*Harmonic Analysis of NDVI Time-Series – HANTS*), proposto por Roerink *et al.* (2000), foi aplicado para suavizar os perfis temporais, eliminando as inconsistências presentes nos dados extraídos das imagens. A Figura 2 ilustra o exemplo do efeito da correção dos dados de NDVI quinzenais durante o ano de 2008 em uma área do Pantanal coberta por Floresta Estacional Decidual.

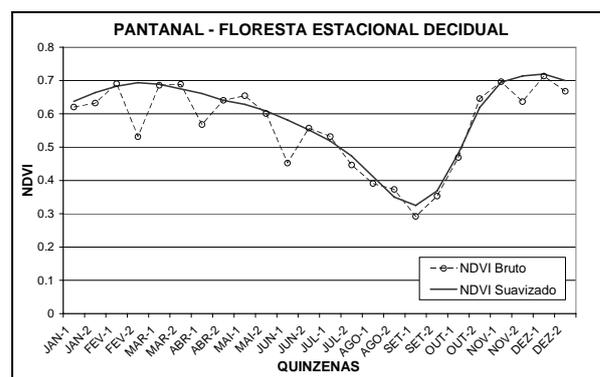


Fig. 2 – Efeito da correção dos dados brutos de NDVI por meio de análise harmônica.

Neste exemplo, os dados brutos apresentaram oscilações não decorrentes da variação natural do NDVI. O algoritmo HANTS corrige estas variações, partindo do princípio que o NDVI apresenta uma variação sazonal ao longo do ano, neste caso

ocasionada pela perda das folhas da floresta decidual. O algoritmo então determina uma onda harmônica para representar o comportamento temporal do local e ajusta os pontos oscilantes à essa curva.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.1 Processamento das imagens AVHRR/NOAA

A Tabela 2 mostra o resultado do processamento dos cinco anos de imagens NOAA. Das 2.887 imagens processadas, 1.118 (39%) deram origem a produtos com precisão geométrica dentro de um pixel, sendo incluídas na geração das composições quinzenais. As demais imagens não alcançaram essa precisão geométrica e foram descartadas. As falhas de posicionamento das imagens descartadas se deveram à grande cobertura de nuvens e ao baixo ângulo de elevação do satélite no momento da passagem, o que acabou afetando o processo de georreferenciamento automático realizado pelo NAVPRO, cujo sucesso depende de uma porcentagem mínima da imagem livre de nuvens. Considerando as 1.118 imagens georreferenciadas pelo sistema NAVPRO, os deslocamentos médios nos sentidos Norte-Sul e Leste-Oeste foram de 0,68 e 0,50 pixel, respectivamente.

A Figura 3 mostra, como exemplo, a composição de mínimo valor do IVM na segunda quinzena de abril de 2008. As refletâncias são mostradas numa escala de níveis de cinza, onde as áreas mais escuras indicam baixa refletância da superfície, resultante da alta absorção da radiação eletromagnética causada pela presença da umidade.

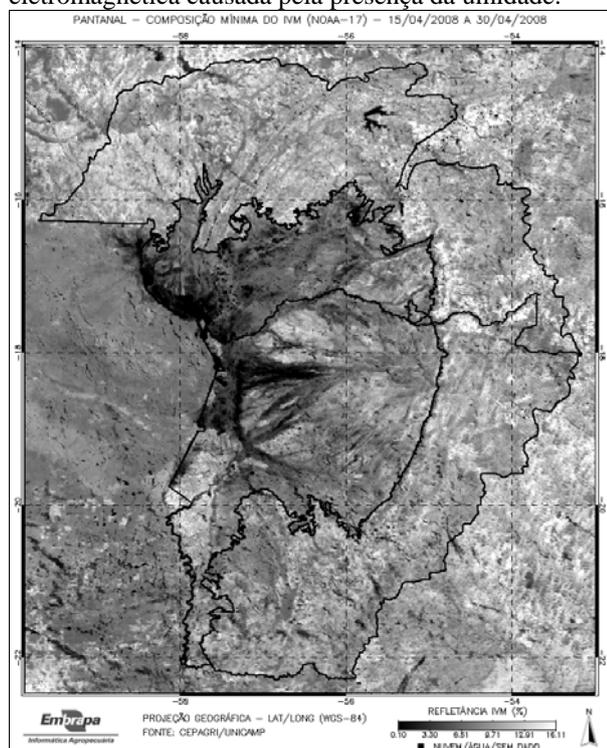


Fig. 3 – Composição de mínimo valor do IVM na segunda quinzena de abril de 2008.

3.2 Análise do NDVI

A Figura 4 mostra os gráficos do comportamento temporal do NDVI das quatro áreas estudadas entre os anos de 2004 e 2008. Na Área 1, composta por Floresta Semi-decidual às margens do Rio Taquari, o NDVI manteve-se constante ao longo dos meses, com leve queda a partir de junho. Este comportamento é compatível com o tipo de vegetação predominante na área, caracterizada por florestas com árvores de 15 a 20 metros (ou mais), com perda de folhas no inverno menos intensa.

A Área 2, composta por Savana Estépica Parque, é caracterizada por árvores esparsas e cobertura contínua de gramíneas (ABDON e SILVA, 2006). Está localizada numa região fortemente influenciada pelas cheias do Pantanal, o que provoca uma variação acentuada nos valores do NDVI, podendo decrescer de 0,40 para menos de 0,10, como em 2006. As datas de ocorrência dessas quedas do NDVI variam de ano para ano, em função das épocas de cheias (que no Pantanal podem variar) e do estado do vigor vegetativo da cobertura vegetal.

Na Área 3, com a presença de Pastagem Plantada, o comportamento da curva do NDVI assemelhou-se àquela observado na Área 1, porém com patamares mais baixos de biomassa. Nota-se que o comportamento pouco variável do NDVI indica que nessa área não ocorreram cheias que cobrissem a vegetação local.

Na Área 4, composta por regiões agrícolas, o NDVI é bastante variável, aumentando fortemente no período da safra de verão (a partir de setembro). No caso de 2007, os valores do início do ciclo eram de 0,18 e passaram a 0,70 no pico vegetativo, no final de novembro. Essa variação brusca está relacionada à alta dinâmica espectral das áreas agrícolas, que apresentam solo exposto no início do ciclo e alta quantidade de biomassa no período de pico vegetativo.

3.3 Análise do IVM

A Figura 5 mostra os gráficos do comportamento temporal da refletância do IVM nas quatro áreas estudadas entre 2004 e 2008. A faixa do infravermelho médio é fortemente influenciada pela presença de água na superfície, que tem efeito de absorção da energia eletromagnética. Por essa razão, essa faixa pode indicar a presença de água ou alta umidade na superfície terrestre. Nos gráficos, a refletância no IVM é inversamente proporcional à presença da água, ou seja, quanto maior a presença de água na superfície, menor sua refletância.

Na Área 1, não há variações bruscas da refletância no IVM e os menores valores ocorrem em junho, época das cheias nessa região. A influência da água no comportamento espectral dessa superfície é menor, uma vez que a cobertura vegetal é composta por floresta alta e densa, com baixa exposição do solo.

TABELA 2 – CONTAGEM DO NÚMERO DE IMAGENS PROCESSADAS, A PORCENTAGEM DE ACERTOS E OS DESLOCAMENTOS MÉDIOS.

Ano	Total Processado	Não Georreferenciadas	Georreferenciadas	Acertos (%)	Deslocamento Médio (pixel)	
					Norte-Sul	Leste-Oeste
2004	304	190	114	37,5	0,72	0,43
2005	654	421	233	35,6	0,65	0,52
2006	670	427	243	36,2	0,69	0,43
2007	677	400	277	40,9	0,71	0,56
2008	582	331	251	43,0	0,65	0,55
Total	2.887	1.769	1.118	39,0	0,68	0,50

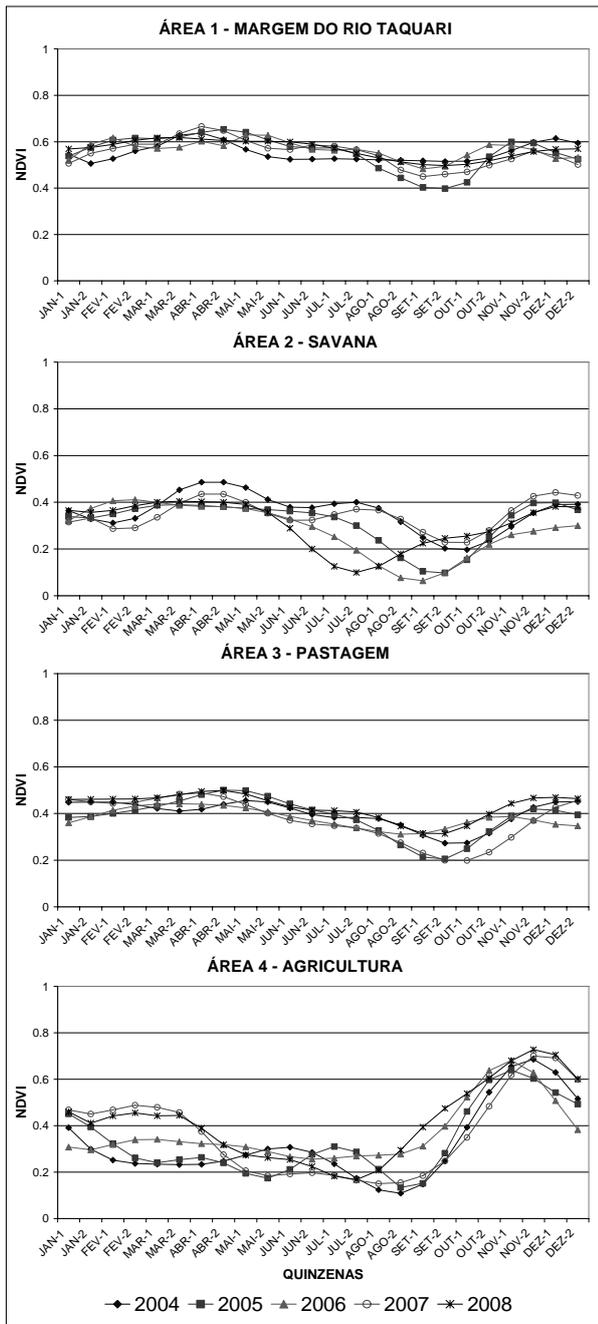


Fig. 4 – Variação temporal do NDVI das quatro áreas analisadas entre 2004 e 2008.

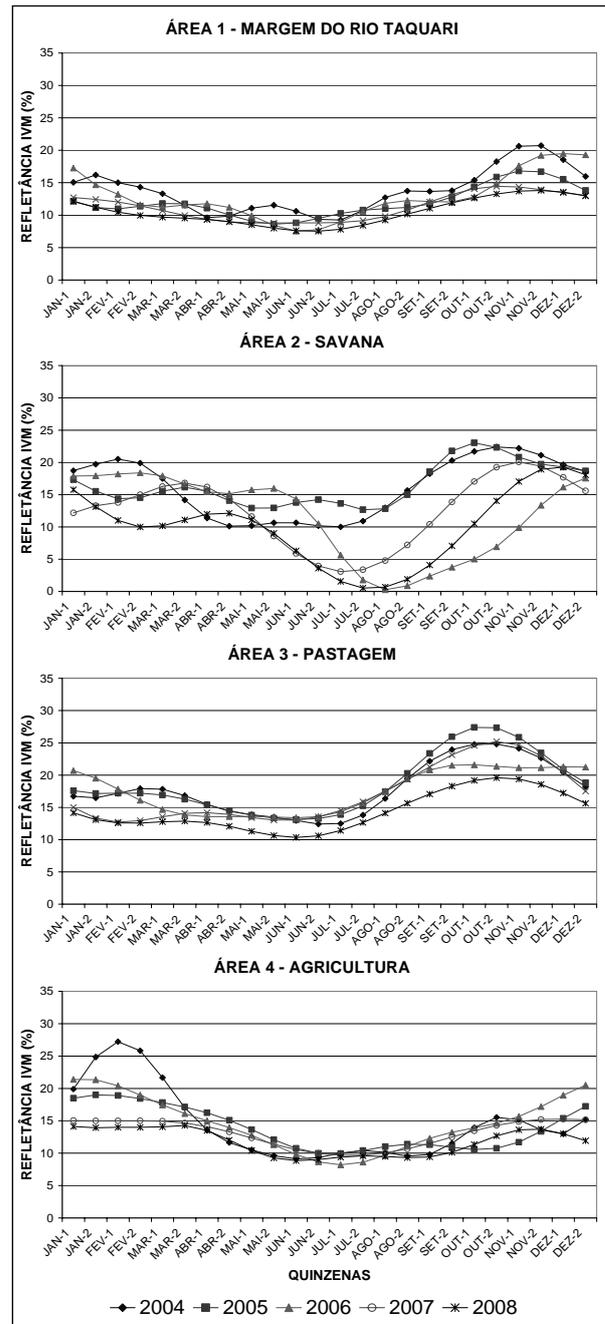


Fig. 5 – Variação temporal do IVM das quatro áreas analisadas entre 2004 e 2008.

Já na Área 2, a influência da água na refletância no IVM é bastante intensa, uma vez que a área sofre forte influência das cheias e a cobertura vegetal fica submersa inteira ou parcialmente. No ano de 2006, a refletância no IVM caiu de 15% na primeira quinzena de junho para quase zero no início de agosto, no ápice das cheias nessa região. Considerando que a resolução espacial do sensor AVHRR é baixa, pode-se considerar que quase a totalidade da área amostral de 4km² estava submersa em agosto de 2006. Entretanto, observa-se que nos anos de 2004 e 2005 não houve redução significativa da refletância no IVM. Isso se explica pelo fato de ter havido nesses anos grandes estiagens, que resultaram em uma pequena cheia em 2004 e em seca em 2005, conforme as medições realizadas no Rio Paraguai, em Ladário-MS, pela Embrapa Pantanal (EMBRAPA PANTANAL, 2006).

Em todos os anos analisados houve a ocorrência de *El Niño* de fraca intensidade, embora não haja evidências de efeitos pronunciados nas chuvas dessa região por conta desses eventos (CPTEC, 2009). De acordo com os perfis temporais dos cinco anos, observa-se também que há uma variação tanto da época de início das cheias, como no nível da água nesses períodos.

Na Área 3 houve uma variação da refletância no IVM ao longo do ano, com valores mais baixos em junho na época das cheias e valores mais altos em outubro, no ápice da estiagem nessa região. Entretanto, nota-se que os valores mais baixos da refletância não são menores que 10%, mostrando que essa região não é propensa a cheias que encobrem totalmente o solo. Na Área 4, as refletâncias no IVM também são pouco variáveis, com menores valores ocorrendo em julho, na época das cheias e os valores maiores na época de estiagem, entre novembro em março. No ano de 2004 observou-se um pico de refletância em fevereiro, provavelmente causado por exposição do solo durante a estiagem.

3.4 Análise do NDMI

A Figura 6 mostra o comportamento temporal do índice NDMI nas áreas analisadas ao longo dos cinco anos. A fórmula do NDMI é semelhante à fórmula do NDVI, com exceção da banda do infravermelho médio, usada no lugar da banda do vermelho visível, tornando o índice mais sensível à presença da água na vegetação (WILSON e SADER, 2002). Na Área 1, o comportamento temporal do NDMI foi semelhante ao NDVI, com valores pouco variáveis ao longo dos meses, com leve queda na época de estiagem.

Na Área 2 verificou-se uma variação grande dos valores do NDMI, que aumentaram significativamente nos anos de 2006, 2007 e 2008 na época das cheias. No caso de 2006, os valores passaram de -0,22 em junho para 0,40 em agosto. Valores negativos do NDMI indicam cobertura vegetal baixa, com exposição de solos mais secos, enquanto que valores positivos indicam aumento da cobertura vegetal

e da umidade dos solos. Esses valores são compatíveis com a vegetação presente nessa área. Já nos anos de 2004 e 2005, que foram mais secos, não houve resposta do NDMI na época das cheias.

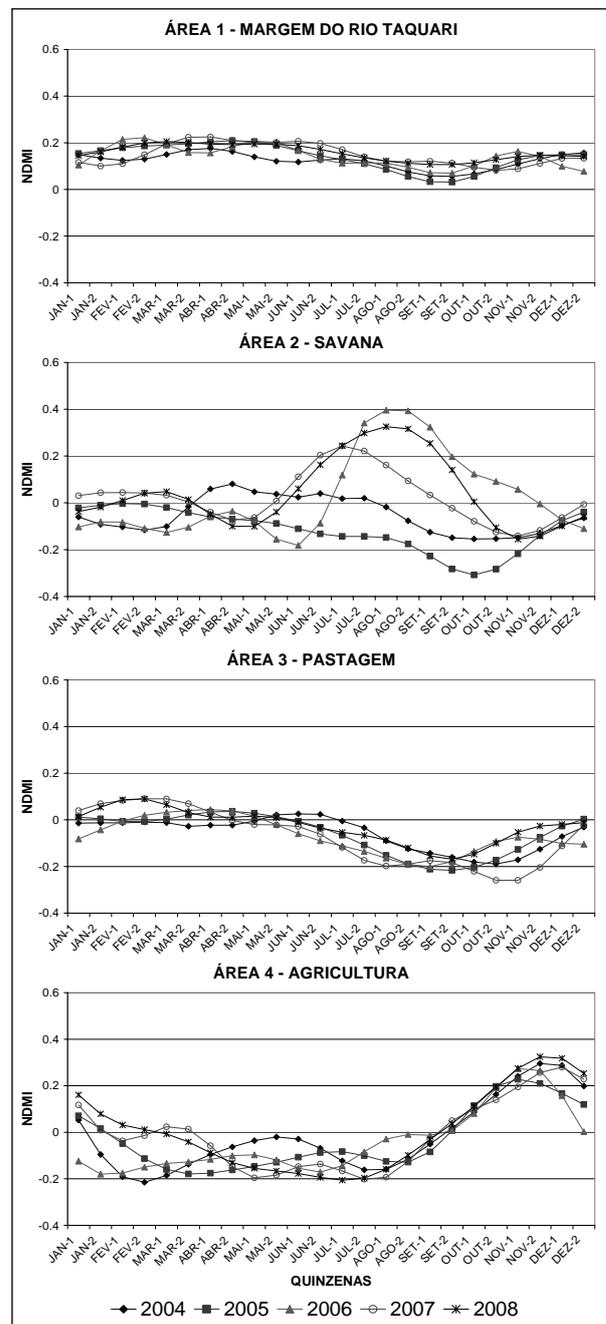


Fig. 6 – Variação temporal do NDMI das quatro áreas analisadas entre 2004 e 2008.

Na Área 3 os valores do NDMI permaneceram próximos a zero de janeiro a julho, quando reduziram a cerca de -0,2 na época de estiagem. Não houve grandes variações desse índice na época de cheias, já que nessa área não ocorrem alagamentos. Na Área 4, o comportamento do NDMI foi semelhante ao comportamento do NDVI, com valores aumentado significativamente na época do cultivo, quando a quantidade de biomassa aumentou. Tanto na Área 3,

como na Área 4, o aumento do NDMI esteve mais relacionado à maior resposta da refletância do IVP do que da refletância do IVM.

3.5 Análise conjunta das variáveis no ano de 2008

Foram também conduzidas análises comparativas do comportamento entre as variáveis, utilizando-se como base o ano de 2008, considerado típico do ponto de vista hídrico. A Figura 7 ilustra gráficos onde são traçados os perfis das três variáveis em cada área ao longo do ano de 2008.

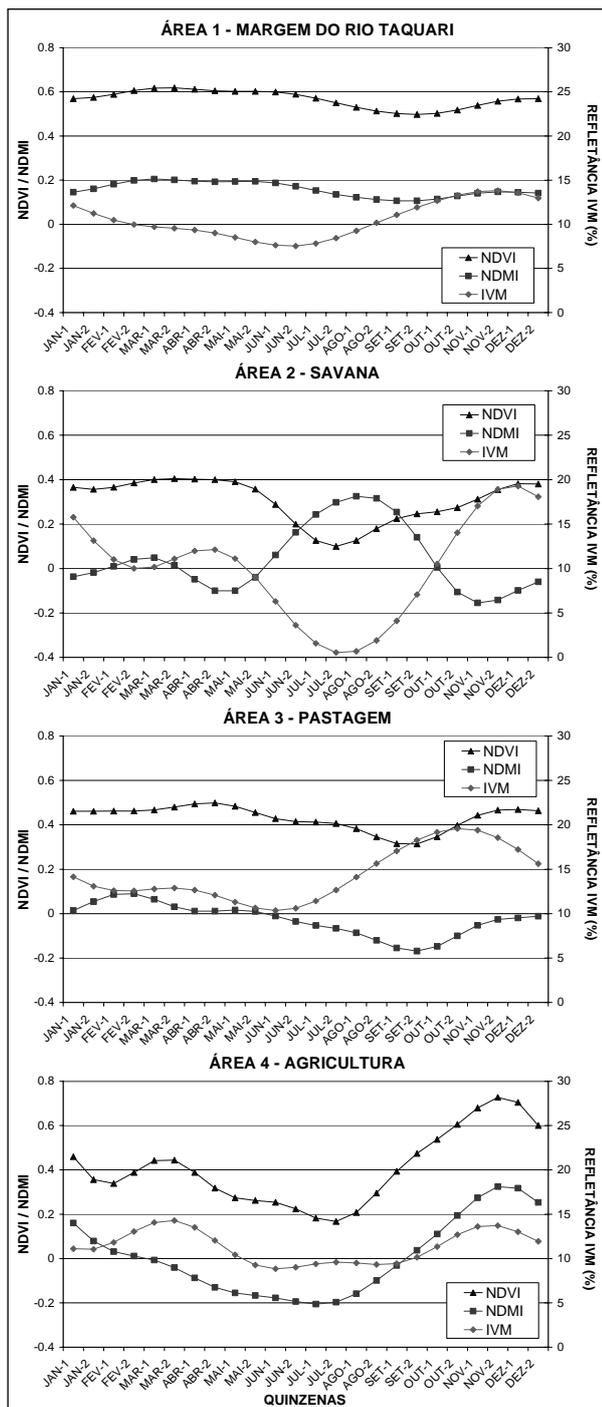


Fig. 7 – Variação do NDVI, NDMI e IVM das quatro áreas analisadas no ano de 2008.

De acordo com a Figura 7, o comportamento das curvas do NDVI e NDMI nas Áreas 1, 3 e 4 é semelhante, embora apresentem patamares diferentes. Valores mais altos de NDVI corresponderam a valores mais altos de NDMI, e vice-versa. Essa análise visual é comprovada pela Tabela 3, onde são mostrados os coeficientes de correlação de Pearson obtidos entre as variáveis espectrais.

TABELA 3 – COEFICIENTES DE CORRELAÇÃO ENTRE AS VARIÁVEIS ESPECTRAIS NAS QUATRO ÁREAS ANALISADAS NO ANO DE 2008.

Área	Coeficiente de Correlação (r)*		
	NDVI vs NDMI	NDMI vs IVM	NDVI vs IVM
1 – Rio Taquari	0,97	-0,52	-0,51
2 – Savana	-0,83	-0,92	0,79
3 – Pastagem	0,88	-0,60	-0,45
4 – Agricultura	0,95	0,62	0,70

* Nível de significância de 95%.

Os coeficientes de correlação entre as variáveis NDVI e NDMI nas áreas 1, 3 e 4 foram altos, chegando a 0,97 na região de Floresta Estacional Semi-Decidual às margens do Rio Taquari. Já na Área 2, sujeita à inundação, o coeficiente de correlação foi elevado, porém negativo. Isso ocorreu porque essa relação foi inversamente proporcional na época das cheias, quando os valores de NDVI decresceram e os valores de NDMI aumentaram. Constatou-se, portanto, que o NDMI apresentou resposta inversa ao NDVI apenas na área onde a superfície sofreu alagamento, onde a presença da água teve um forte efeito de redução do NDVI (pela submersão da vegetação) e aumento do NDMI (pela alta absorção da radiação na faixa do IVM, presente da fórmula desse índice).

Em relação ao NDMI e IVM, as correlações foram negativas na maioria dos casos, o que faz sentido, já que altos valores de IVM estão relacionados à menor umidade do solo e, portanto, a menores valores do índice de umidade NDMI. A correlação mais significativa ocorreu na Área 2, onde houve inundação, alcançando um coeficiente de -0,92. Apenas na Área 4 (região agrícola) o coeficiente de correlação foi positivo, ou seja, aumentos do IVM significaram aumentos do NDMI. Isso porque, na época da safra de verão, ocorreu uma produção acentuada de biomassa e o consequente aumento da refletância na faixa do IVP. Dessa forma, o NDMI foi mais fortemente influenciado pelo aumento na refletância do IVP (presente na fórmula do índice) do que pelo aumento da refletância do IVM, o que elevou os valores do índice.

As correlações obtidas entre NDVI e IVM foram mais baixas em comparação às demais. A correlação mais significativa foi positiva e ocorreu na Área 2, onde houve inundação. Isso porque a presença de água na superfície levou os valores do IVM próximos a zero e também reduziu os valores do NDVI por conta da submersão da vegetação presente na área.

4. CONCLUSÕES E SUGESTÕES

Os resultados mostraram o potencial do monitoramento temporal na determinação dos padrões espectrais de áreas do Pantanal, cujo entendimento é importante para se verificar suas variações inter-anuais.

A análise do NDVI permitiu a caracterização do padrão temporal dos tipos de vegetação estudados. Regiões de vegetação mais intensa, como as Florestas Estacionais Semi-Deciduais, mostraram valores de NDVI mais estáveis ao longo do ano, com leve queda nas épocas secas. Áreas propensas a inundações apresentaram fortes reduções do NDVI nas cheias e áreas agrícolas apresentaram altos valores do índice nas épocas do pico vegetativo das culturas.

A análise do IVM mostrou resultados interessantes nas áreas inundáveis, pois permitiu detectar o padrão das cheias do Pantanal e diferenciar os anos com maiores volumes de água, assim como os anos mais secos. A resposta do IVM somente foi mais intensa em áreas onde ocorreram inundações e exposição da água.

O NDMI mostrou comportamento semelhante ao NDVI, o que ficou comprovado pelos coeficientes de correlação obtidos entre as duas variáveis, alcançando $r=0,97$ na região de Floresta Estacional. Os índices foram distintos somente na área sujeita a inundação, onde houve uma correlação negativa de $-0,88$.

O entendimento do padrão temporal anual e inter-anual das variáveis, em especial do NDVI e IVM, é importante para o monitoramento do bioma Pantanal. Variações do padrão temporal do NDVI podem indicar alterações da vegetação causadas por ações naturais ou antrópicas, como desmatamentos. Além disso, variações do padrão temporal do IVM podem indicar problemas relacionados a seca ou cheias acima do normal.

Sugere-se, como futuros estudos, determinar o padrão temporal espectral em locais que passaram por desmatamentos ou queimadas, onde a cobertura vegetal foi eliminada, de modo a verificar a alteração no padrão do NDVI após esses eventos. Dessa forma, seria possível o desenvolvimento de sistemas inteligentes que pudessem detectar qualquer variação bruta dos padrões espectrais. Outra sugestão é realizar o mapeamento de áreas alagadas utilizando dados do IVM, de modo a detectar todas as áreas que apresentassem elevado gradiente entre a época de cheia e a época de seca, como se verificou na Área 2 deste estudo.

As ferramentas computacionais para processamento de imagem e tratamento dos dados foram fundamentais para a análise do elevado número de dados presentes na série temporal de cinco anos.

AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem ao CEPAGRI/UNICAMP por ceder as imagens NOAA utilizadas

neste trabalho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ABDON, M. M.; SILVA, J. S. V. **Fisionomias da vegetação nas sub-regiões do Pantanal brasileiro**. São José dos Campos: INPE; Campinas: Embrapa Informática Agropecuária, 2006. CD-ROM.

ANTUNES, J. F. G.; ESQUERDO, J. C. D. M. Geração automática de produtos derivados de imagens AVHRR-NOAA para monitoramento de áreas inundáveis do Pantanal. **Revista Brasileira de Cartografia**, n.59, n.1, p.115-122, 2007.

CPTEC. **El Nino e La Niña**. Disponível em <<http://enos.cptec.inpe.br/>>. Acesso: 09 setembro. 2009.

EMBRAPA PANTANAL. **Cheia do Rio Paraguai no Pantanal é a maior dos últimos nove anos**. Disponível em <<http://www.cpap.embrapa.br/destaques/cheia3.htm>>. Acesso: 05 agosto 2008.

EMERY, W. J.; BALDWIN, D. G.; MATTHEWS, D. Maximum cross correlation automatic satellite image navigation and attitude corrections for open-ocean image navigation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.41, n.1, p.33-42, 2003.

ESQUERDO, J. C. D. M.; ANTUNES, J. F. G.; BALDWIN, D. G.; EMERY, W.J.; ZULLO JÚNIOR. An automatic system for AVHRR land surface product generation, **International Journal of Remote Sensing**, v.27, n.18, p.3925-3942, 2006.

GOODRUM, G.; KIDWELL, K.; WINSTON, W. (Editors) **NOAA KLM User's guide**. September 2000 Revision. Disponível em <<http://www2.ncdc.noaa.gov/docs/klm>>. Acesso: 15 março 2004.

HOLBEN, B. N. Characteristics of maximum value composite images from temporal AVHRR data. **International Journal of Remote Sensing**, v.7, n.11, p.1417-1435, 1986.

JIN, S.; SADER, S. A. Comparison of time series tasseled cap wetness and the normalized difference moisture index in detecting forest disturbances. **Remote Sensing of Environment**, v. 94, n.3, p.364-372, 2005.

ROERINK, G. J.; MENENTI, M.; VERHOEF, W. Reconstructing cloudfree NDVI composites using Fourier analysis of time series. **International Journal of Remote Sensing**, v.21, n.9, p.1911-1917, 2000.

ROSBOROUGH, G. W.; BALDWIN, D. G.; EMERY, W. J. Precise AVHRR image navigation. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v.32, n.3, p.644-657, 1994.

ROUSE, J. W.; HAAS, R. H.; SCHELL, J. A.; DEERING, D. W. Monitoring vegetation systems in the great plains with ERTS. In: Earth Resources Technology Satellite-1 Symposium, 3., Washington, D. C., 1973. **Proceedings...** Washington, D. C.: NASA. Goddard Space Flight Center, 1973. v.1, p.309-317. (NASA SP-351).

TUCKER, C. J. Red and photographic infrared linear combinations for monitoring vegetation. **Remote Sensing of Environment**, v.8, p.127-150, 1979.

WILSON, E. H.; SADER, S.A. Detection of forest harvest type using multiple dates of Landsat TM imagery. **Remote Sensing of Environment**, v.80, p.385-396, 2002.